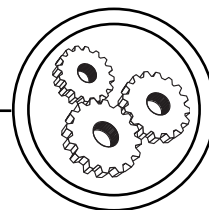


## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ



УДК 621.923

### **ВЕРСТАТИ ДЛЯ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ НА БАЗІ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ТИПУ «КІЛЬЦЕВА ВАННА» З РАДІАЛЬНИМ ЗАВАНТАЖЕННЯМ: АНАЛІЗ КІНЕМАТИКИ ОБРОБКИ ДИСКОВИХ ФРЕЗ**

© В. М. Гейчук, к.т.н., доцент, НТУУ «КПІ», Київ, Україна

**В работе выполнено исследование влияния размерных параметров дисковых фрез, основных размеров станка и скоростей движения фрезы на углы атаки на поверхностях зубьев дисковых фрез. Установлено, что за счет выбора составляющих суммарной скорости резания можно в определенных пределах управлять величинами углов атаки на обрабатываемых поверхностях.**

**Research of influence of size parameters of disk milling cutters is in-process executed, basic sizes of machine-tool and rates of movement of milling cutter on the angle of attack on the surfaces of teeth of disk milling cutters. It is set that due to the choice of constituents of total speed of cutting it is possible in certain limits to manage the angles of attack values on the processed surfaces.**

#### **Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень**

Для дослідження кінематики процесу МАО дискових фрез та пил на роторних верстатах з магнітною системою типу «кільцева ванна» з радіальним завантаженням оброблюваного інструменту було розроблено математичну модель процесу [1].

Раніше розроблена математична модель кінематики обробки дискових фрез на роторних верстатах з магнітною системою типу «кільцева ванна» з торцевим завантаженням фрези [1] дозволила провести дослідження, в результаті яких визначені основні залежності розмірів ротора та магнітної системи верстата від кінематичних параметрів процесу обробки. Встановлено,

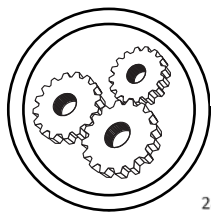
що при традиційних співвідношеннях величин складових сумарної швидкості обробки передня та бокові поверхні зуба знаходяться в несприятливих умовах [2]. Результати проведених досліджень дають змогу керувати величинами кутів атаки на поверхнях зубів фрези за рахунок вибору певних розмірів ротора і магнітної системи і варіювання складовими сумарної швидкості різання.

#### **Мета роботи**

Тому метою роботи є:

— дослідження впливу розмірних параметрів дискових фрез, основних розмірів верстата та швидкостей руху фрези на кути атаки на різних поверхнях зуба фрези;

— аналіз результатів досліджень і на їх основі розробка ре-



## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

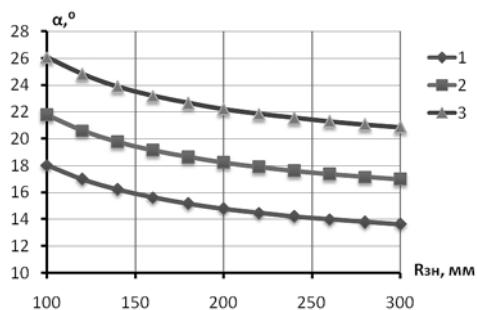


Рис. 1. Залежність кута коливання від радіусу полюсних наконечників:  $B_{фр} = 6$  мм,  $Z = 40$ ,  $H = 30$  мм, (1 —  $D_{фр} = 315$  мм; 2 —  $D_{фр} = 250$  мм; 3 —  $D_{фр} = 200$  мм)

комендацій з призначення величин окремих складових сумарної швидкості різання.

### Результати виконаних досліджень

Дослідження залежностей максимальних кутів коливання  $\alpha$  від геометричних параметрів робочої зони (ширини  $H$ , радіальних розмірів) та кутів атаки на поверхнях зуба дискових фрез та пил від кута коливання  $\alpha$ , складових сумарної швидкості різання  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_k$ , та геометричних параметрів робочої зони було виконано на прикладі фрези  $D_{фр} = 315$  мм,  $z = 40$ ,  $B_{фр} = 6$  мм.

Максимальні кути коливання фрези. Як показали розрахунки, для верстата з торцевим завантаженням при  $L_0 = 0$  мм,  $R_{зн} = 200$  мм та  $H = 30$  мм максимально можливий кут коливання

фрези складає  $9^\circ$ , а при  $L_0 = 100$  мм він складає вже  $24^\circ$  [2].

Для верстата з радіальним завантаженням при тій же ширині робочої зони максимальний кут коливання складає  $15^\circ$ . Вплив таких геометричних параметрів кільцевої ванни як  $R_{зн}$  та  $R_{ц}$  на величину максимального кута коливання незначний (рис. 1).

**Кути атаки.** Дослідження кутів атаки виконувались при таких значеннях кутових швидкостях фрези:  $\omega_p = 25$  рад/с,  $\omega_{s0} = 3,17$  рад/с,  $\omega_{k0} = 5,6$  рад/с, кут коливання  $\alpha = 20^\circ$  — додатний.

**Кути атаки по висоті зуба.** На рис. 2 представлені залежності кутів атаки на передній поверхні вздовж бокової нижньої різальної кромки від відстані  $h$  від вершини зуба.

Кути атаки по висоті зуба змінюються мало, в середньому на

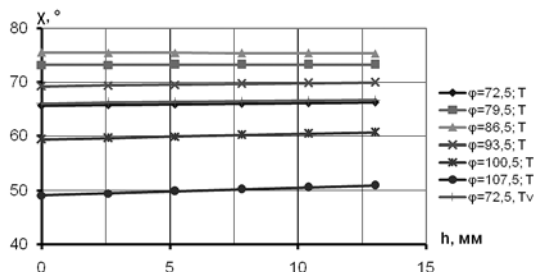


Рис. 2. Кути атаки на передній поверхні вздовж бокової нижньої різальної кромки при зустрічній обробці ( $\omega_p +$ ,  $\omega_{s0} -$ ; « $\omega_k +$ » означає, що  $\omega_k > 0$ ; « $\omega_k -$ » означає, що  $\omega_k < 0$ )

# МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

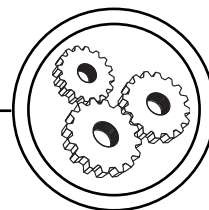
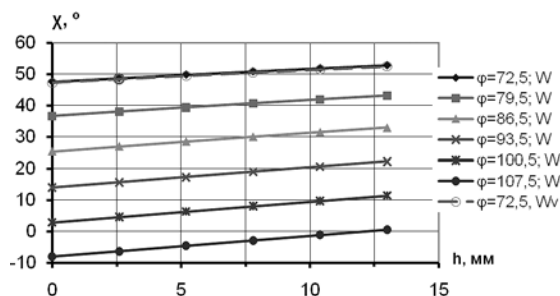


Рис. 3. Кути атаки на задній поверхні вздовж нижньої кромки при зустрічній обробці ( $\omega_p^-$ ,  $\omega_{s0}^+$ )



2°. Характер залежності — близький до лінійного. По ширині зуба кути атаки змінюються ще в меншій мірі — до 1°. Про це свідчать залежності кута атаки на верхній боковій ріжучій кромці при вході в кільцеву ванну (наприклад, при  $\phi = 72,5^\circ$ ).

Більш значні зміни кутів атаки по висоті зуба спостерігаються при зустрічній обробці задньої поверхні зуба (рис. 3).

Тут по висоті зуба спостерігаються зміни кутів атаки в середньому на  $5^\circ$ . По ширині зуба кути атаки змінюються значно менше — до  $1^\circ$ . Про це свідчать залежності кута атаки в нижній і верх-

ній точці головної різальної кромки при  $\phi = 72,5^\circ$ .

На рис. 4 представлені залежності кутів атаки на боковій верхній поверхні при зустрічній обробці передньої поверхні.

І на боковій поверхні кути атаки вдовж бокової різальної кромки по висоті змінюються мало — не більше  $0,3^\circ$ . Вдовж бокової задньої кромки ці зміни значно більші — до  $2^\circ$ .

Тому подальші дослідження залежності кутів атаки в різних зонах оброблюваного сектора фрези будемо проводити в таких характерних точках робочих поверхонь зуба:

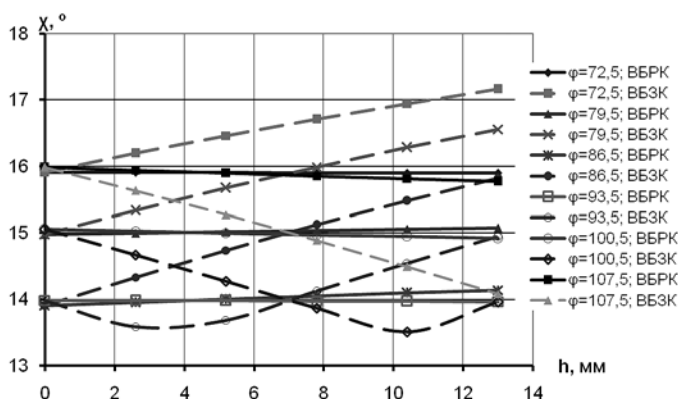
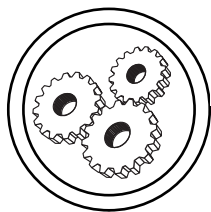


Рис. 4. Кути атаки на боковій верхній поверхні при зустрічній обробці передньої поверхні ( $\omega_p^+$ ,  $\omega_{s0}^-$ ): BPK — верхня бокова ріжуча кромка; B3K — верхня бокова задня кромка



## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

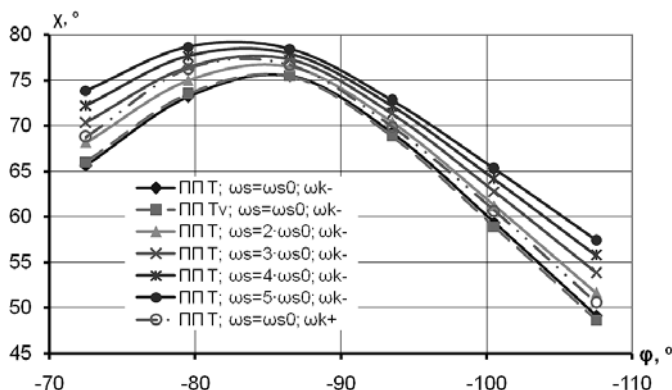


Рис. 5. Кути атаки на передній поверхні в нижній точці головної різальної кромки при зустрічній обробці ( $\omega_p+$ ,  $\omega_{s0}+$ ): ПП Т — передня поверхня, точка  $T_1$ ; ПП Tv — передня поверхня, точка  $T_6$

— в крайніх точках головної різальної кромки (точки  $T_1$  ( $W_1$ ) та  $T_{v1}$  ( $W_{v1}$ ));

— в нижніх точках задньої поверхні (точки  $W_6$  та  $W_{v6}$ ).

*Кути атаки та швидкості різання на передній поверхні зуба*

*При зустрічній обробці.* На рис. 5 представлені залежності кутів атаки на передній поверхні

в різних зонах оброблюваного сектора фрези.

Аналіз залежностей дає змогу зробити висновок, при традиційних співвідношеннях швидкостей головного руху та подач (осциляції) [3] кути атаки на передній поверхні при зустрічній обробці знаходяться в межах  $48 \div 76^\circ$ . Збільшення швидкості обертання фрези в 5 раз приво-

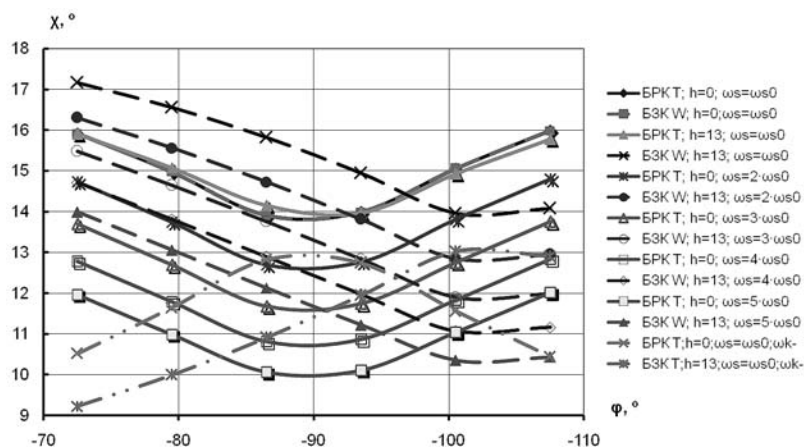


Рис. 6. Кути атаки на бічній верхній поверхні при зустрічній обробці передньої поверхні ( $\omega_p+$ ,  $\omega_{s0}+$ ): БРК — бокова ріжуча кромка; БЗК — бокова задня кромка

# МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

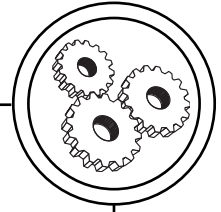
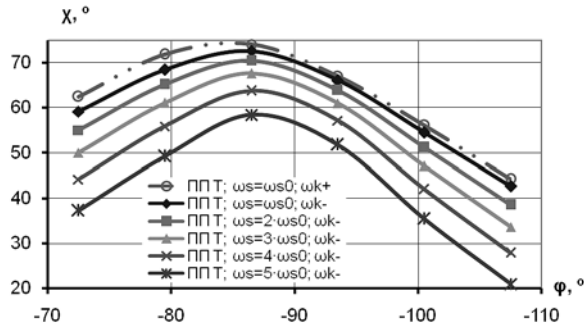


Рис. 7. Кути атаки на передній поверхні в нижній точці головної різальної кромки при попутній обробці ( $\omega_p+$ ,  $\omega_{s0}+$ ): ППТ — передня поверхня, точка Т1



дить до росту кутів атаки в середньому на  $8^\circ$ . Зміна напрямку швидкості коливання (з «-» на «+») приводить до збільшення кутів атаки в середньому на  $2^\circ$ .

Кути атаки на боковій поверхні (рис. 6) при традиційних співвідношеннях швидкостей знаходяться в межах  $10 \div 17^\circ$ .

Збільшення швидкості обертання фрези в 5 раз приводить до зменшення кутів атаки в середньому на  $4^\circ$ . Характер зміни кутів — нелінійний. На боковій різальній кромці він має явно виражений мінімум в середній точці оброблюваного сектора фрези ( $\phi = 90^\circ$ ). В нижній точці біля задньої поверхні зуба ця за-

лежність має падаючий характер з деяким збільшенням кута на виході із кільцевої ванни.

Зміна напрямку швидкості коливання (з «-» на «+») приводить до зменшення кутів атаки в середньому на  $2^\circ$ . При цьому криві є дзеркальним відображенням відповідних кривих при протилежному напрямку швидкості коливання.

При попутній обробці. На рис. 7 представлені залежності кутів атаки на передній поверхні в різних зонах оброблюваного сектора фрези.

Аналіз залежностей дає змогу зробити висновок, що при традиційних співвідношеннях

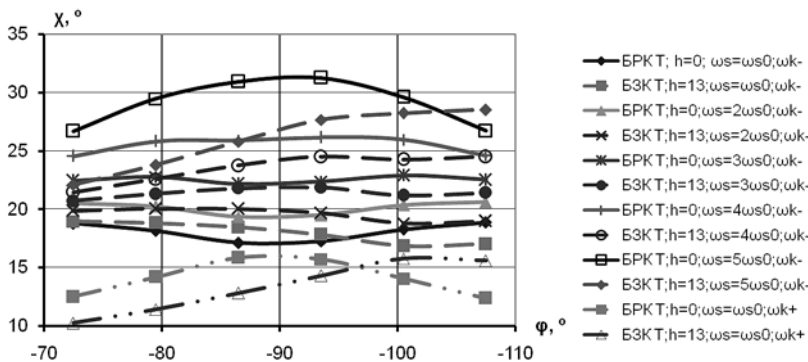
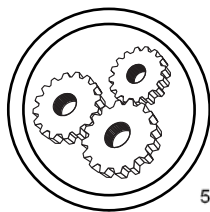


Рис. 8. Кути атаки на бічній верхній поверхні при попутній обробці передньої поверхні ( $\omega_p+$ ,  $\omega_{s0}+$ ): БПК — бокова ріжуча кромка; БЗК — бокова задня кромка



## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

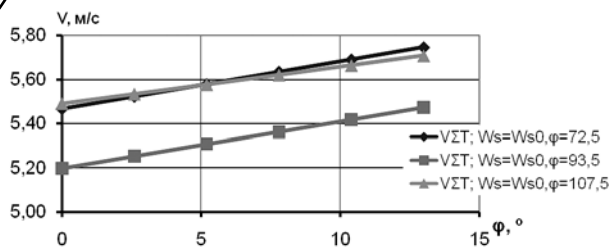


Рис. 9. Зміна сумарної швидкості різання в нижній точці головної різальної кромки  $V_{\Sigma T}$  по висоті зуба при зустрічній обробці

швидкостей кути атаки на передній поверхні при попутній обробці знаходяться в межах  $42 \div 72^\circ$ . Збільшення швидкості обертання фрези в 5 раз приводить до зменшення кутів атаки в середньому на  $15^\circ$ . Зміна напрямку швидкості коливання (з «-» на «+») приводить до збільшення кутів атаки в середньому на  $2^\circ$ .

Кути атаки на боковій поверхні (рис. 8) при традиційних співвідношеннях швидкостей знаходяться в межах  $10 \div 19^\circ$ . Збільшення швидкості обертання фрези в 5 раз приводить до збільшення кутів атаки до  $32^\circ$ . Характер зміни кутів — нелінійний. На боковій різальній кромці він має явно виражений мінімум в середній точці оброблюваного сектора фрези ( $\varphi = 90^\circ$ ) при швидкостях кругової подачі до  $\omega_S = 4\omega_{S0}$ . При більших швидкостях крива є випуклою. В нижній

точці біля задньої поверхні зуба ця залежність має падаючий характер з деяким збільшенням кута на виході із кільцевої ванни.

Зміна напрямку швидкості коливання з «-» на «+» приводить до зменшення кутів атаки в середньому на  $2^\circ$ . При цьому криві є дзеркальним відображенням відповідних кривих при протилежному напрямку швидкості коливання.

Окрім кутів атаки на оброблюваних поверхнях важливою характеристикою є величина сумарної швидкості різання. Тому при виборі схеми обробки потрібно дослідити величини сумарної швидкості різання на оброблюваних поверхнях.

### Швидкості різання при обробці передньої поверхні

При зустрічній обробці. На рис. 9 представлені залежності сумарної швидкості різання в

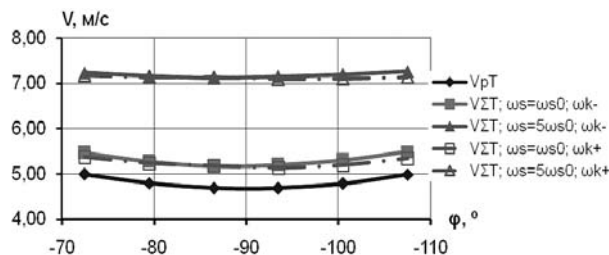


Рис. 10. Швидкості головного руху  $V_p$  та сумарні швидкості різання  $V_{\Sigma T}$  вздовж оброблюваного сектора фрези нижньої точки головної різальної кромки при зустрічній обробці

## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

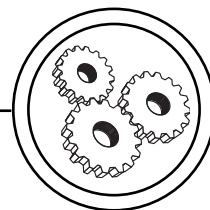
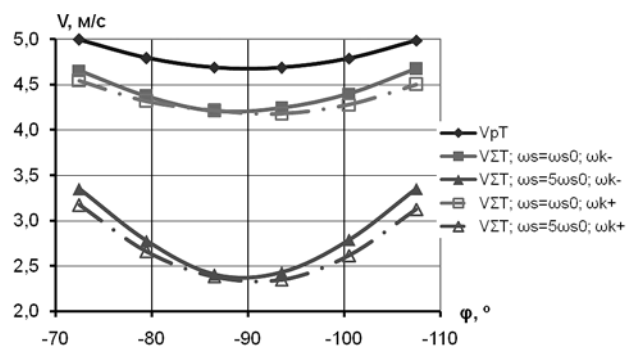


Рис. 11. Швидкості головного руху  $V_p$  та сумарні швидкості різання  $V_{\Sigma T}$  вздовж оброблюваного сектора фрези нижньої точки головної різальної кромки при попутній обробці



трьох характерних точках оброблюваного сектора фрези нижньої точки головної різальної кромки при зустрічній обробці. Сумарна швидкість різання мало залежить від положення на зубі. Різниця між швидкостями на вершині зуба і біля його основи складає не більше 0,3 м/с, що складає 6 % від швидкості головного руху на вершині зуба ( $V_p = 5$  м/с, див. рис. 10). Характер залежності — близький до лінійної.

На рис. 10 представлені залежності швидкості головного руху та сумарної швидкості різання вздовж оброблюваного сектора фрези нижньої точки головної різальної кромки при зустрічній обробці.

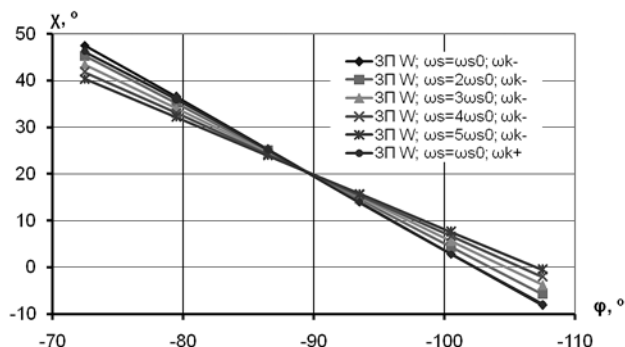
При  $\omega_s = \omega_{s0}$  сумарна швидкість різання більша від швид-

кості головного руху в середньому на 0,5 м/с, що складає 10 %. При  $\omega_s = 5\omega_{s0}$  ця різниця складає в середньому 2 м/с, або 40 % в більшу сторону і складає в середньому 7,1 м/с. Вздовж оброблюваного сектора фрези швидкості змінюються незначною мірою — не більше ніж на 8 %. Зміна напрямку коливального руху впливає незначною мірою (при прийнятих швидкостях).

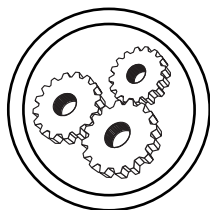
При попутній обробці. На рис. 11 представлені залежності швидкості головного руху та сумарної швидкості різання вздовж оброблюваного сектора фрези нижньої точки головної різальної кромки при попутній обробці.

При  $\omega_s = \omega_{s0}$  сумарна швидкість різання менша від швидкості головного руху в середньо-

Рис. 12. Кути атаки на задній поверхні в нижній точці головної різальної кромки при зустрічній обробці ( $\omega_p +$ ,  $\omega_{s0} +$ ): ЗП W — задня поверхня, точка  $W_1$







## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

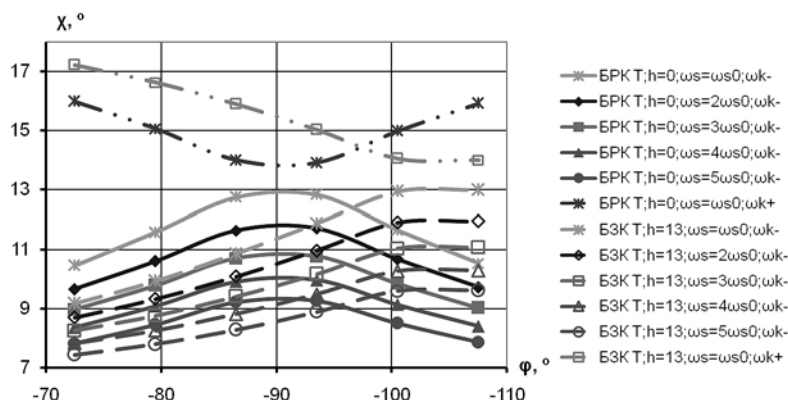


Рис. 13. Кути атаки на бічній верхній поверхні при зустрічній обробці передньої поверхні ( $\omega_p$ ,  $\omega_s$ ): БРК — бокова ріжуча кромка; БЗК — бокова задня кромка

му на 0,5 м/с, що складає 10 %. При  $\omega_s = 5\omega_{s0}$  ця різниця складає в середньому 2 м/с, або 40 % в меншу сторону і складає в середньому 2,8 м/с. Вздовж оброблюваного сектора фрези швидкості змінюються не більше ніж на 8 % при  $\omega_s = \omega_{s0}$ , а при  $\omega_s = 5\omega_{s0}$  — в середньому на 20 %. Зміна напрямку коливального руху впливає незначною мірою.

### Кути атаки на задній поверхні зуба

При зустрічній обробці. На рис. 12 представлені залежності кутів атаки на задній поверхні в різних зонах оброблюваного сектора фрези.

Аналіз залежностей дає змогу зробити висновок, що при традиційних співвідношеннях швидкостей кути атаки на задній поверхні при зустрічній обробці знаходяться в межах  $40^\circ \div 10^\circ$ . Збільшення швидкості обертання фрези в 5 раз приводить до росту кутів атаки в середньому на  $8^\circ$ . Зміна напрямку швидкості коливання з «-» на «+» приводить до збільшення кутів атаки в середньому на  $1^\circ$ . На відміну від аналогічних залежностей при обробці передньої поверхні ці залежності мають такі особливості:

— близький до лінійного характер;

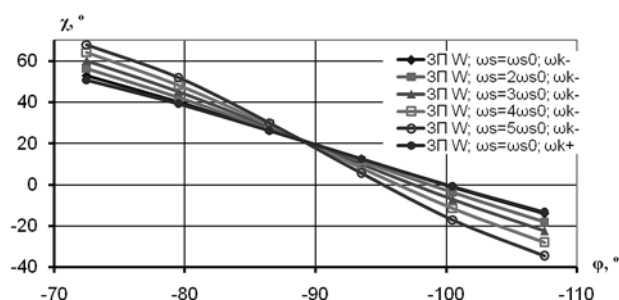


Рис. 14. Кути атаки на задній поверхні в нижній точці головної різальної кромки при попутній обробці ( $\omega_p$ ,  $\omega_{s0}$ ): ПП Т — передня поверхня, точка  $W_1$



# МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

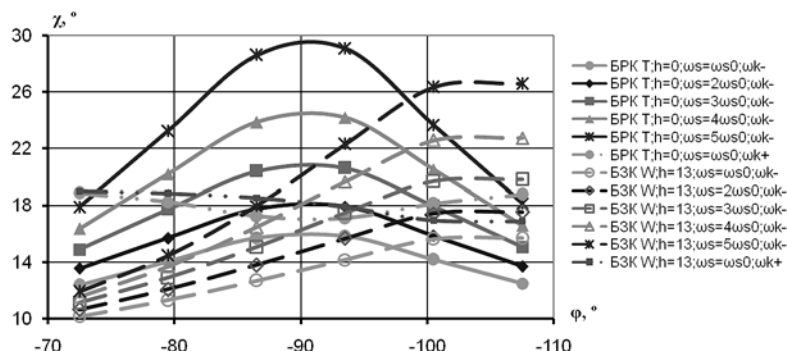
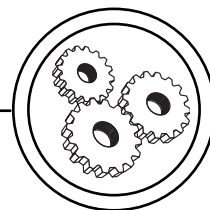


Рис. 15. Кути атаки на бічній верхній поверхні при попутній обробці передньої поверхні ( $\omega_p-$ ,  $\omega_{s0}-$ ): БПК — бокова ріжуча кромка; БЗК — бокова задня кромка

— при значній зміні швидкості обертання фрези кути атаки змінюються мало;

— на виході із кільцевої ванни спостерігаються від'ємні кути атаки — головна різальна кромка в цій області знаходиться в «тіньовій зоні».

Ці особливості залежності кутів атаки на задній поверхні пояснюються її розташуванням по відношенню до передньої.

Кути атаки на боковій нижній поверхні (рис. 13) при традиційних співвідношеннях швидкостей знаходяться в межах  $10\div 12^\circ$ .

Збільшення швидкості обертання фрези в 5 раз приводить до зменшення кутів атаки в середньому на  $2^\circ$ . Характер зміни кутів — нелінійний. На боковій різальній кромці він має явно виражений максимум в середній точці оброблюваного сектора фрези ( $\varphi = 90^\circ$ ). В нижній точці біля задньої поверхні зуба ця залежність має падаючий характер з деяким зменшенням кута на виході із кільцевої ванни.

Зміна напрямку швидкості коливання з «-» на «+» приводить до зменшення кутів атаки в се-

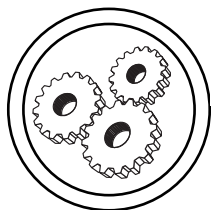
редньому на  $2^\circ$ . При цьому криві є дзеркальним відображенням відповідних кривих при протилежному напрямку швидкості коливання.

*При попутній обробці.* На рис. 14 представлені залежності кутів атаки на задній поверхні в різних зонах оброблюваного сектора фрези.

При традиційних співвідношеннях швидкостей кути атаки на задній поверхні при зустрічній обробці знаходяться в межах  $55\div 16^\circ$ . Характер залежності — близький до лінійного. Збільшення швидкості обертання фрези в 5 раз приводить до росту кутів атаки в середньому на  $15^\circ$ . При цьому характер залежності стає нелінійним з точкою перелому при куті, близькому до  $\varphi = 90^\circ$ . Зміна напрямку швидкості коливання з «-» на «+» приводить до зменшення кутів атаки в середньому на  $2^\circ$ .

Кути атаки на боковій поверхні (рис. 15) при традиційних співвідношеннях швидкостей знаходяться в межах  $14\div 18^\circ$ .

Збільшення швидкості обертання фрези в 5 раз приводить



## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

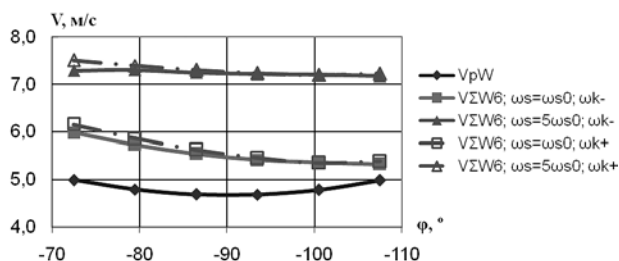


Рис. 16. Швидкості головного руху  $V_p$  та сумарні швидкості різання  $V_{\Sigma W}$  вздовж оброблюваного сектора фрези нижньої точки задньої кромки при зустрічній обробці

до збільшення кутів атаки до  $30^\circ$ . Характер зміни кутів — нелінійний. На боковій різальній кромці він має явно виражений максимум в середній точці оброблюваного сектора фрези ( $\varphi = 90^\circ$ ). В нижній точці біля задньої поверхні зуба ця залежність має зростаючий характер з деяким зменшенням кута на виході із кільцевої ванни.

Зміна напрямку швидкості коливання з «-» на «+» приводить до зменшення кутів атаки в середньому на  $2^\circ$ . При цьому криві є дзеркальним відображенням відповідних кривих при протилежному напрямку швидкості коливання.

### Швидкості різання при обробці задньої поверхні

При зустрічній обробці. На рис. 16 представлені залежності швидкості головного руху та сумарної швидкості різання вздовж оброблюваного сектора фрези нижньої точки головної різальної кромки по задній поверхні при зустрічній обробці.

При  $\omega_s = \omega_{s0}$  сумарна швидкість різання більша від швидкості головного руху в середньому на  $0,8$  м/с, що складає  $16\%$ . При  $\omega_s = 5\omega_{s0}$  ця різниця складає в середньому  $2,5$  м/с, або  $50\%$  в більшу сторону і складає в середньому  $7,3$  м/с. При  $\omega_s =$

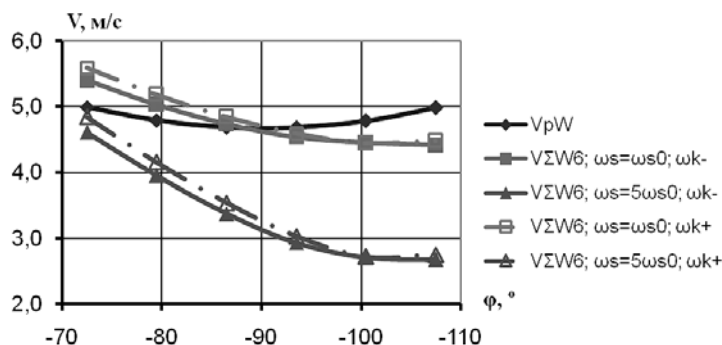
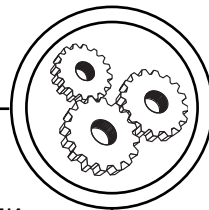


Рис. 17. Швидкості головного руху  $V_p$  та сумарні швидкості різання  $V_{\Sigma W}$  вздовж оброблюваного сектора фрези нижньої точки головної різальної кромки при попутній обробці

## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ



$= 5\omega_{S0}$  вздовж оброблюваного сектора фрези швидкості змінюються незначною мірою — не більше ніж на 8 %, а при  $\omega_S = \omega_{S0}$  різниця на вході і виході кільцевої ванни складає 16 %. Зміна напрямку коливального руху впливає незначною мірою.

При попутній обробці. На рис. 17 представлені залежності швидкості головного руху та сумарної швидкості різання вздовж оброблюваного сектора фрези нижньої точки задньої кромки при попутній обробці.

При  $\omega_S = \omega_{S0}$  сумарна швидкість різання менша від швидкості головного руху в середньому на 0,5 м/с, що складає 10 %. При  $\omega_S = 5\omega_{S0}$  ця різниця складає в середньому 2 м/с, або 40 % в меншу сторону і складає 2,7 м/с на виході із кільцевої зони. Вздовж оброблюваного сектора фрези швидкості змінюються не більше ніж на 8 % при  $\omega_S = \omega_{S0}$ , а при  $\omega_S = 5\omega_{S0}$  — в середньому на 20 %. Зміна напрямку коливального руху впливає незначною мірою.

### Висновки

1. Найбільш прийнятними методами обробки передньої поверхні за значеннями кутів атаки ( $20\text{—}55^\circ$ ) є метод попутної обробки при збільшеній швидкості обертання фрези ( $\omega_S = 5\omega_{S0}$ ). При цьому прийнятними є кути і на бічній поверхні ( $20\text{—}30^\circ$ ). Але величина сумарної швидкості різання є заниженою (2,5—3,5 м/с). Для підвищення сумарної швидкості різання потрібно знайти раціональні співвідношення  $V_p$  та  $V_S$  при яких кути атаки будуть знаходитись в зазначених межах.

2. Найбільш прийнятними методами обробки задньої та бокової поверхонь за значеннями кутів атаки ( $50\text{—}10^\circ$  на задній та  $16\text{—}25^\circ$  на боковій) є метод попутної обробки при збільшеній швидкості обертання фрези ( $\omega_S = 3\omega_{S0}$ ). Але величина сумарної швидкості різання є заниженою (2,5—4,5 м/с). Для підвищення сумарної швидкості різання потрібно знайти раціональні співвідношення  $V_p$  та  $V_S$ , при яких кути атаки будуть знаходитись в зазначених межах.

1. Гейчук В. М., Шевчук В. А., Гаврушкевич А. Ю. Верстати для магнітно-абразивної обробки на базі магнітної системи типу «кільцева ванна»: кінематика обробки дискових фрез // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Машинобудування. — 2006. — Вип. 48. — С. 121—131. 2. Гейчук В. М. Верстати для магнітно-абразивної обробки на базі магнітної системи типу «кільцева ванна»: аналіз кінематики обробки дискових фрез // Научно-технический журнал «Технологические системы» ВАТ «Український науково-дослідний інститут авіаційних технологій». — Київ. — 2007. — Вип. № 2(38). — С. 33—42. 3. Майборода В. С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь. Дис. докт. техн. наук. — Київ, 2001. — 404 с.

Рецензент — Ю. М. Данильченко, д.т.н., НТУУ «КПІ»

Надійшла до редакції 18.04.08